

VŠB - Technická univerzita Ostrava
Fakulta elektrotechniky a informatiky

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

**VŠB – Technická univerzita Ostrava
Fakulta elektrotechniky a informatiky
Katedra elektroenergetiky**

**Potenciál návratnosti malé vodní elektrárny na
řece Dyji**

**Payback period potential of the small
hydropower plant on the Dyje river**

VŠB - Technická univerzita Ostrava
Fakulta elektrotechniky a informatiky
Katedra elektroenergetiky

Zadání bakalářské práce

Student: **Lukáš Bartůněk**
Studijní program: B2649 Elektrotechnika
Studijní obor: 3907R001 Elektroenergetika
Téma: **Potenciál návratnosti malé vodní elektrárny na řece Dyji**
Payback period potential of the small hydropower plant on the Dyje river

Zásady pro vypracování:

1. Parametry vodního toku
2. Energetický potenciál v dané lokalitě
3. Volba typu turbíny a alternátoru, elektrické schéma
4. Připojovací podmínky k síti
5. Ekonomické vyhodnocení navržených variant


Seznam doporučené odborné literatury:

- [1] Doležal, J., a kol.: Jaderné a klasické elektrárny, ČVUT, Praha, 2011, ISBN: 978-80-01-04937-2
- [2] Mastný, P., a kol: Obnovitelné zdroje elektrické energie, ČVUT, Praha, 2011, ISBN: 978-80-01-04936-5


Formální náležitosti a rozsah bakalářské práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.

Vedoucí bakalářské práce: **prof. Ing. Karel Sokanský, CSc.**

Datum zadání: 30.11.2012
Datum odevzdání: 07.05.2013



prof. Ing. Stanislav Rusek, CSc.
vedoucí katedry



prof. RNDr. Václav Šnášel, CSc.
děkan fakulty



Prohlašuji, že jsem tuto bakalářskou práci vypracoval samostatně. V seznamu použité literatury jsem uvedl všechny literární prameny a publikace, ze kterých jsem čerpal.

V Ostravě dne 7. května 2013

.....

Podpis studenta

Děkuji vedoucímu bakalářské práce panu prof. Ing. Karlu Sokanskému, CSc., za cenné rady a připomínky, které mi poskytoval při vypracování této bakalářské práce.

Abstrakt bakalářské práce

Tato bakalářská práce se zabývá vodohospodářským a hydroenergetickým řešením strojní a elektrické části malé vodní elektrárny. Je zde proveden návrh strojní a elektrické části malé vodní elektrárny pro konkrétní odtokovou křivku. Na základě změřených a vypočtených údajů byl zvolen vhodný typ turbíny. V práci je obsažen návrh řešení pro variantu s Bánkiho a Kaplanovou turbínou. Pro obě varianty je vypočten instalovaný výkon a množství vyrobené elektrické. Na závěr jsou určeny investiční náklady a doba návratnosti investic.

Klíčová slova

Malá vodní elektrárna, Bánkiho turbína, Kaplanova turbína.

Abstract of the Bachelor thesis

This bachelor thesis deals with water management and hydroelectric solution of machinery and electrical parts of small hydropower plant. There is a proposal of mechanical and electrical part of small hydropower plant for concrete run-off curve. On the basis of the measured and calculated data was chosen a suitable type of turbine. The work included design solutions for a variant with Banki and Kaplan turbine. For both versions are calculated installed capacity and the amount of electricity produced. At the end are intended investment costs and payback periods.

Keywords

small hydropower plant, Banki turbine, Kaplan turbine.

Seznam použitých symbolů:

Značka	Název veličiny	Jednotka	
		Hlavní	Vedlejší
a	plocha šterbiny	m^2	
A	vyrobená elektřina	Wh	kWh; MWh
$A_{T,V}$	teoreticky využitelné energie	Wh	kWh; MWh
c	rychlost	$m.s^{-1}$	
d_h	průměr hřídele	m	mm
d_2	vnitřní průměr turbíny	m	mm
D	průměr turbíny	m	mm
DN	světlost lopatek	m	mm
E_H	měrná energie vody	$J.kg^{-1}$	
E_T	teoretický hydroenergetický potenciál	W	
h'	výška dotykového dohu	m	
H	spád	m	
H_b	hrubý spád	m	
$H_{stř}$	střední spád	m	
H_0	spád na začátku roku	m	
H_{30}	třicetidenní spád	m	
$\sum h_{z1}$	státy spádu	m	
$\sum h_{z1-n}$	součet hydraulických ztrát v přívodu vody	m	
I_N	jmenovitý proud	A	
k	součinitel ostřiku	-	
k_v	koeficient ročního využití MVE	-	
k_{ld}	součinitel délky a průměru	-	
L	délka šterbiny	m	mm
L_2	dálka turbíny	m	mm
n	otáčky	$ot.min^{-1}$	
N	celkové investiční náklady	Kč	
N_{inv}	měrné investiční náklady	kč	
p	tlak	$N.m^{-2}$	
P	výkon na prahu vodní elektrárny	W	kW
P_i	instalovaný výkon	W	kW
$P_{T,V}$	teoreticky využitelný výkon	W	kW

Q	průtok	m^3s^{-1}	
Q_{\max}	maximální průtok turbínou	m^3s^{-1}	
Q_{\min}	minimální průtok turbínou	m^3s^{-1}	
Q_V	využitelný průtok	m^3s^{-1}	
$Q_{V\text{stř}}$	střední využitelný průtok	m^3s^{-1}	
Q_0	průtok na začátku roku	m^3s^{-1}	
Q_{30}	třicetidenní průtok	m^3s^{-1}	
s	otevření štěrbiny	m	mm
T	doba návratnosti	roky	
T	doba využití instalovaného výkonu	h	
T	počet hodin	h	
tl.	tloušťka stěny	m	mm
U	napětí	V	kV
U_N	jmenovité napětí	V	kV
Z_r	doba návratnosti	roky	
α	součinitel nerovnoměrnosti rychlosti (Coriolisovo číslo)	m.s^{-1}	
η_c	celková účinnost	-	%
η_g	účinnost generátoru	-	%
η_p	účinnost převodu	-	%
η_t	účinnost turbíny	-	%
η_{tr}	účinnost transformátoru	-	%
ρ	hustota	kg.m^{-3}	

Obsah:

1. ÚVOD.....	11
2. VODOHOSPODÁŘSKÉ A HYDROENERGETICKÉ ŘEŠENÍ MVE.....	11
2.1 HYDROENERGETICKÝ POTENCIÁL VODNÍHO TOKU.....	11
2.1.1 Měrná energie vody.....	11
2.1.2 Hrubý hydroenergetický potenciál.....	11
2.1.3 Teoretický hydroenergetický potenciál.....	12
2.1.3 Reálně využitelný hydroenergetický potenciál.....	12
2.2 ZÁKLADNÍ PARAMETRY HYDROENERGETICKÉHO DÍLA.....	12
2.3 DĚLENÍ VODNÍCH ELEKTRÁREN PODLE SPÁDU.....	15
2.3.1 Nízkotlaké vodní elektrárny.....	15
2.3.2 Středotlaké vodní elektrárny.....	15
2.3.3 Vysokotlaké vodní elektrárny.....	15
2.4 DĚLENÍ VODNÍCH ELEKTRÁREN PODLE ZPŮSOBU PROVOZU.....	15
2.4.1 Průtočné vodní elektrárny.....	15
2.4.2 Regulační vodní elektrárny.....	15
2.5 ŘEŠENÍ PRŮBĚŽNÉ VODNÍ ELEKTRÁRNY.....	16
3. STROJNÍ ČÁST MALÉ VODNÍ ELEKTRÁRNY.....	17
3.1 VOLBA TURBÍNY PODLE SPÁDU.....	17
3.2 TURBÍNY.....	18
3.2.1 Kaplanova turbína.....	18
3.2.2 Bánkiho turbína.....	19
3.3 KAVITACE.....	24
3.4 SAVKY PŘETLAKOVÝCH TURBÍN.....	25
3.5 PŘEVODY.....	25
3.5.1 Ozubená soukolí.....	25
3.5.2 Řemenové převody.....	25
3.5.3 Řetězové převody.....	26
3.6 UZÁVĚRY.....	26
4. ELEKTRICKÁ ČÁST MALÉ VODNÍ ELEKTRÁRNY.....	27
4.1 GENERÁTORY.....	27
4.1.1 Asynchronní generátor.....	27
4.1.2 Synchronní generátor.....	28
4.2 SILNOPROUDÁ ZAŘÍZENÍ MVE.....	29
4.3 VLASTNÍ SPOTŘEBA MALÉ VODNÍ ELEKTRÁRNY.....	29
5. NÁVRH MALÉ VODNÍ ELEKTRÁRNY.....	30

5.1. VÝPOČET TEORETICKÉHO VÝKONU, TEORETICKÉ ENERGIE VODNÍHO TOKU...	32
5.2. VARIANTA S BÁNKIHO TURBÍNOU.....	33
5.2.1. Turbína.....	33
5.2.2. Výpočet instalovaného výkonu.....	33
5.2.3. Výpočet množství vyrobené elektrické energie.....	34
5.3. VARIANTA S KAPLANOVOU TURBÍNOU.....	35
5.3.1. Turbína.....	35
5.3.2. Výpočet instalovaného výkonu.....	35
5.3.3. Výpočet množství vyrobené elektrické energie.....	36
5.4. GENERÁTOR.....	37
5.5. ELEKTRICKÉ SCHÉMA MVE.....	37
5.6. PŘIPOJENÍ MVE K ROZVODNÉ SÍTI.....	38
6. NÁVRATNOST MALÉ VODNÍ ELEKTRÁRNY.....	38
6.1. INVESTIČNÍ NÁKLADY NA VÝSTAVBU MVE.....	38
6.2. DOBA NÁVRATNOSTI INVESTIC.....	38
6.3. DOTACE.....	39
7. ZÁVĚR.....	40
POUŽITÁ LIERATURA.....	41

1. ÚVOD

V současné době je již kapacita primárního hydroenergetického potenciálu z větší částí naplněna. Proto v současné době probíhají rekonstrukce, nová výstavba a inovace malých vodních elektráren. Tyto nové moderní vodní elektrárny jsou plně automatické a potřebují jen minimum nebo žádnou obsluhu. Celkový technicky využitelný potenciál našich toků je přibližně 2830 Gwh ročně [5]. V současnosti je na území České republiky provozováno přibližně 1354 malých vodních elektráren, které převážně využívají již vybudovaných jezů, výpustných potrubí z rybníků a nádrží. Pomocí malých vodních elektráren, instalovaných na vhodných místech, lze zabezpečit 4 procenta roční výroby elektrické energie v České republice.

V této bakalářské práci vyhotoven rozbor využití hydroenergetického potenciálu zadaného toku. Pro tento vodní tok bude zvolen vhodného typ vodní turbíny a navržena optimální varianta řešení strojní části vodní elektrárny. Poté bude každá z navržených variant ekonomicky posouzena.

2. VODOHOSPODÁŘSKÉ A HYDROENERGETICKÉ ŘEŠENÍ MVE

2.1. *Hydroenergetický potenciál vodního toku*

Hydroenergetickým potenciálem vodního toku je celková energie odtékající vody.

2.1.1. Měrná energie vody

Tato energie se vypočte podle Bernoulliho rovnice z potenciální, tlakové a kinetické složky, podle následujícího vztahu:

$$E_H = gH + \frac{p}{\rho} + \frac{c^2}{2} \text{ (J.kg}^{-1}\text{; m; N.m}^{-2}\text{; kg.m}^{-3}\text{; m.s}^{-1}\text{)} \quad (2.1)$$

kde H- výška nad srovnávací rovinou

p- tlak

c- rychlost

ρ - hustota vody

2.1.2 Hrubý hydroenergetický potenciál

Hrubý hydroenergetický potenciál ovlivňuje nadmořská výška hodnocené oblasti a také průměrný průtok toku. Stanovuje se k hladině moře nebo ke kótě hladiny toku na státních hranicích. Celosvětový technicky využitelný hydroenergetický potenciál je asi 3,75TW. Hydroenergetický potenciál České republiky je přibližně 692 MW.

2.1.3 Teoretický hydroenergetický potenciál

Hodnota teoretického hydroenergetického potenciálu se určí jako integrál potenciálů jednotlivých úseků vodních toků určených ze středních ročních průtoků podle vztahu:

$$E_T = g \int_0^H Q(H) \cdot dH \quad (\text{W}; \text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}; \text{m}) \quad (2.2)$$

kde $Q(H)$ - střední objemový průtok elementárního úseku toku

H , dH - geodetický spád mezi začátkem a koncem toku a jeho element

Pro určení průtokového množství je nutno provádět dlouhodobá hydrologická měření a z nich následně stanovit chronologické čáry průtoků a křivku trvání průtoků. Chronologická čára udává průměrné denní průtoky, ze kterých se statisticky vyhodnotí průměrné měsíční průtoky a z nich se sestaví výsledná křivka trvání průtoků. Plocha pod čarou trvání nám udává množství vody, které proteče měřeným místem za rok.

2.1.4 Reálně využitelný hydroenergetický potenciál

Technicky využitelný potenciál je menší než teoretický, neboť nelze reálně využít celkový spád a proces proměny na elektrickou energii doprovází ztráty různého druhu. Technicky využitelný potenciál je v podmínkách České republiky asi 50 % teoretického potenciálu, což představuje asi 400 MW [9].

2.2. Základní parametry hydroenergetického díla

Pro co největší využití energie vodního toku, je nutné na tomto úseku soustředit spád a průtok.

- **Spád** – výškový rozdíl hladin vody v místě vstupu do vodní elektrárny a v odpadu pod ní.
- **Průtok** – množství vody protékající místem odběru za jednu sekundu.
- **Průtok turbínou** – celkové množství vody protékající turbínou za jednu sekundu. Je to množství vody potřebné pro optimální provoz turbíny při daném zatížení, včetně ztrát.
- **Hltnost** – maximální průtok turbínou při určitém spádu.
- **Hrubý spád H_b** – celkový statistický spád mezi dvěma úseky řeky. Je určen jako rozdíl hladin při nulovém průtoku vodní elektrárnou.
- **Užitný spád H** – výškový rozdíl hladin před poháněným strojem a za ním. Je to hrubý spád, od něhož jsou odečteny hydraulické ztráty.

Užitný spád se vypočte pomocí Bernoulliho rovnice pro vstupní a výstupní profil turbíny pokud průtok turbínou není nulový, tedy za dynamického režimu. Následně je uvedené vzorce pro určení užitého spádu pro hlavní typy vodních turbín.

Pro přetlakové turbíny platí vztah:

$$H = H_b + \frac{\alpha_1 \cdot c_1^2 - \alpha_2 \cdot c_2^2}{2 \cdot g} - \sum h_{z1-n} \text{ (m; } \cdot \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}) \quad (2.3)$$

kde H -užitný spád

α - Coriolisovo číslo

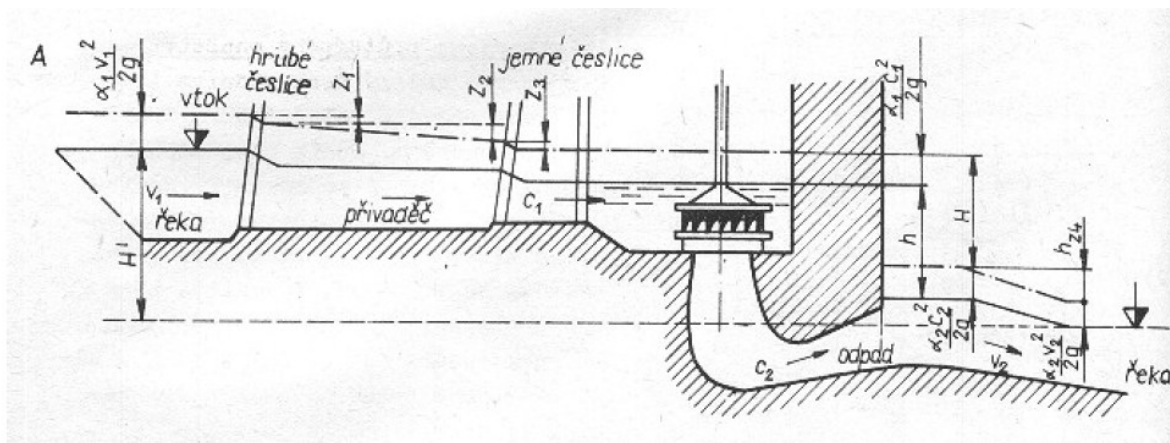
$\sum h_{z1-n}$ jsou ztráty spádu před vstupem do turbíny, které jsou způsobeny v těchto částech objektu elektrárny:

- v česlích,
- přiváděči,
- v tlakovém potrubí a uzávěrech,
- v odpadu.

Užitný spád H se určí tak, že se k hrubému spádu H_b připočte rozdíl rychlostí vody na začátku a na konci měřeného úseku a následně je od něj odečten součet všech ztrát.

Obvykle jsou to tyto ztráty:

- vtoková ztráta,
- ztráta třením,
- ztráty v česlích,
- na vtoku do kašny turbíny,
- ztráty v odpadu.



Obr. 2.1 Schéma pro stanovení čistého užitného spádu pro přetlakovou turbínu v otevřené kašně [1]

Pro rovnotlaké turbíny platí vztah:

$$H = H_b + \frac{\alpha_0 \cdot c_0^2}{2 \cdot g} - \sum h_{z1} - h' \text{ (m; } \cdot \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}) \quad (2.4)$$

kde H -užitný spád

α - Coriolisovo číslo

c - rychlost

$\sum h_{z1}$ - součet hydraulických ztrát v přivodu vody

h' - výška dotykového dohu výtokového paprsku a dělicí kružnici oběžného kola

V této rovnici se zanedbává kinetická energie vody, která opouští výstupní hrany lopatek turbíny. Nemělo by docházet, aby se oběžné kolo rovnotlakých turbín brodilo ve vodě, proto je třeba výšku h' brát jako ztracenou. To vede k tomu, že pokud je užitný spád velmi malý, je pro zajištění přijatelného výkonu potřeba oběžného kola s velkým průměrem. To nelze uskutečnit z mnoha důvodů, například kvůli technologickým a ekonomickým nákladům. Je proto vhodné, aby u malých turbín byl užitný spád větší než 1,5 m a u velkých turbín 3m.

- **Účinnost turbíny**

Účinnost vypočteme jako poměr skutečného výkonu turbíny k teoretickému výkonu.

$$\eta_t = \frac{P}{P_0} \quad (2.5)$$

V této účinnosti jsou zahrnuty hydraulické ztráty η_h a objemové ztráty η_v , ke kterým dochází průtokem vody jednotlivými částmi turbíny a navíc mechanické ztráty η_m , které vznikají třením v ložiskách a ucpávkách turbíny. Pro celkovou účinnost turbíny platí vztah:

$$\eta_t = \eta_h \cdot \eta_v \cdot \eta_m \quad (2.6)$$

Hodnota celkové účinnosti turbíny leží v mezích $\eta_t = 0,8$ až $0,94$. Přičemž platí, že u turbíny s větším výkonem se dosahuje vyšší účinnosti. Mechanický výkon turbíny se v generátoru přeměňuje na elektrický výkon a jeho účinnost se pohybuje v rozmezích $\eta_g = 0,85$ až $0,97$. Elektrický výkon dodávaný do sítě je také ovlivněn účinností transformátoru, která je $\eta_{tr} = 0,92$ až $0,98$. Navíc je třeba zohlednit ztráty převodem η_p . Výsledná účinnost vodní turbíny a generátoru je tedy dána vztahem:

$$\eta_c = \eta_t \cdot \eta_g \cdot \eta_{tr} \cdot \eta_p \quad (2.7)$$

- **Výkon na prahu vodní elektrárny P**

Celkový výkon vodní elektrárny je dán součtem výkonů jednotlivých částí elektrárny.

$$P = 9,81 \cdot Q \cdot H \cdot \eta_c \text{ (kW)} \quad (2.8)$$

- **Instalovaný výkon vodní elektrárny P_i**

$$P_i = 0,95 \cdot P \text{ (kW)} \quad (2.9)$$

Z praktických důvodů se obvykle volí instalovaný výkon P_i menší o 5 % než maximální výkon P_{\max} vodní elektrárny.

- **Výroba vodní elektrárny**

$$A = P \cdot T \text{ (kWh)} \quad (2.10)$$

kde P- výkon

T- počet hodin dodávky elektrické energie

2.3. Dělení vodních elektráren podle spádu

2.3.1 Nízkotlaké vodní elektrárny

Tento typ vodní elektrárny se staví do spádu asi 15 metrů. Pro větší spády by již byla turbínová kašna neúměrně hluboká a pak je výhodnější použít tlakový přivaděč (potrubí).

2.3.2 Středotlaké vodní elektrárny

Do této skupiny patří vodní elektrárny pracující se spády mezi 15m a 50m.

2.3.3 Vysokotlaké vodní elektrárny

Přívod vody do budovy elektrárny je obvykle proveden tlakovým potrubím. Vodní dílo vysokotlaké vodní elektrárny se zřizuje pro spády nad 50 metrů. V některých případech (při použití spirální nebo Bánkiho turbíny), ale i pro spády menší.

2.4. Dělení vodních elektráren podle způsobu provozu

Dle způsobu provozu a zařazení do diagramu zatížení můžeme vodní elektrárny rozdělit na průtočné a regulační.

2.4.1 Průtočné vodní elektrárny

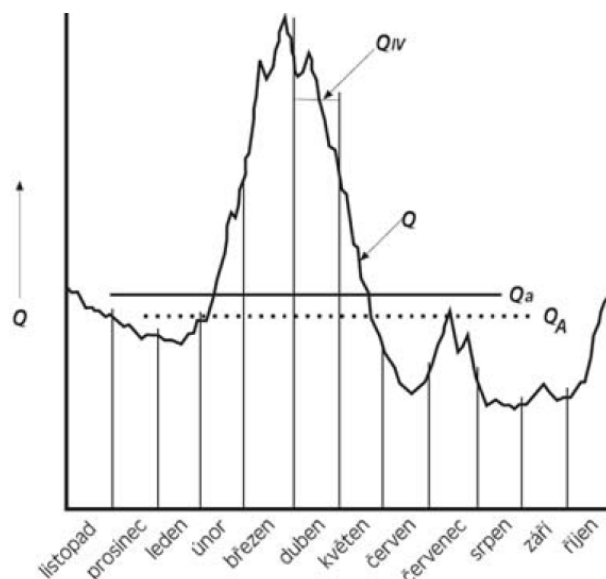
Pracovní pásmo průtočných elektráren je v základní oblasti diagramu zatížení, protože ke generaci svého výkonu využívá právě aktuální hodnotu průtoku vody řečištěm a její výkon se proto nepřizpůsobuje požadavkům odběru v soustavě. U elektráren s malým spádem se s průtokem mění i spád a dokonce při velkých hodnotách průtoku (např. při povodních) může dojít k vyrovnání spodní a horní hladiny s nulovým spádem. Výkon nejprve s rostoucím průtokem stoupá a po dosažení určitého maxima začne klesat až k nule.

2.4.2 Regulační vodní elektrárny

Pracovní pásma regulačních vodních elektráren jsou zpravidla ve špičkové nebo pološpičkové části diagramu zatížení. Ke své činnosti potřebují mít vhodný prostor umožňující akumulaci potenciální energie vody. Tento prostor může být podle přirozených podmínek realizován cestou přirozenou nebo umělou. Pro vytvoření umělých akumulací se používá přehrazení koryta řeky přehradou nebo vybudováním spojovacího (derivačního) kanálu k prostoru přirozené kotliny v okolí koryta řeky.

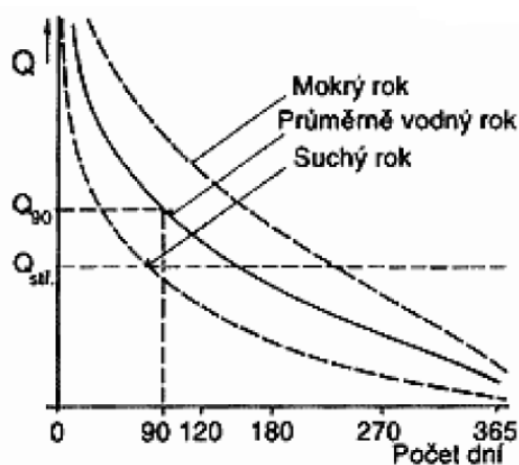
2.5 Řešení průběžné vodní elektrárny

Průběžné malé vodní elektrárny pracují bez akumulace vody. Hodnoty průtoků vody řečištěm si je možno vyžádat u Českého hydrometeorologického ústavu nebo u příslušného povodí řeky. Tyto průtoky jsou zpracovány v grafu v němž je zanesen průtok Q , dlouhodobý průměrný roční průtok Q_a , dlouhodobý průměr Q_A a průměrný měsíční průtok za měsíc duben Q_{IV} . Na následujícím obrázku je znázorněn příklad proměnlivosti průtoků v závislosti na měsících.

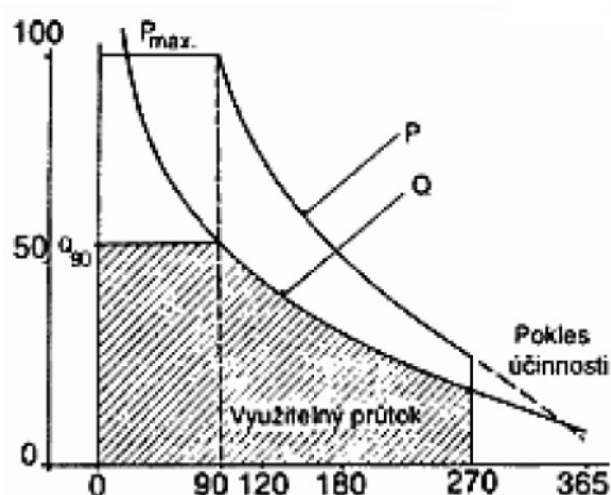


Obr. 2.2 Proměnlivost průtoků v závislosti na měsících [2]

Nejdůležitější hydrologický údaj pro řešení vodní elektrárny je křivka překročení průtoků v průměrném vodním roce. Pro výpočet využití energie vody jsou nejdůležitější M - denní průtoky, které udávají průtoky po určitý počet dní v roce. Obvykle se M – denní průtoky dělí po 30 dnech, ale není to podmínkou. Jak je znázorněno na následujícím obrázku s vyznačeným využitelným průtokem a přímkou výkonů, odtoková křivka má na ose x počet dní a na ose y průtoky Q . Plocha pod křivkou je přímo úměrná vyrobené energii.



Obr. 2.3 Odtoková křivka [3]



Obr. 2.4 Využitelný průtok, přímka [3]

Dalším krokem je určit hltnost instalovaných turbín, což je využitelný průtok vodní elektrárnou v okolí bodu největší křivosti odtokové křivky. Na území České republiky se obvykle vyskytuje v rozmezí Q 90 a Q 120. K přesnému určení využitelného průtoku je potřeba provést technický a ekonomický rozbor malé vodní elektrárny. Pro tento rozbor je nutno znát počet soustrojí, typy vodních turbín, typy generátorů, typy transformátorů, popřípadě převody. Poté se do grafu odtokové křivky zakreslí obrazec pro rozdělení průtoku pro turbínu, nebo popřípadě pro více turbín.

Výkon na hřídeli vodní turbíny se spočítá podle vzorce:

$$P = \rho \cdot g \cdot Q \cdot H \text{ (kW)} \quad (2.11)$$

Doba ročního využití instalovaného výkonu se vypočte podle vzorce:

$$T = \frac{A}{P_i} \text{ (h)} \quad (2.12)$$

Koeficient ročního využití malé vodní elektrárny se vypočte podle vzorce:

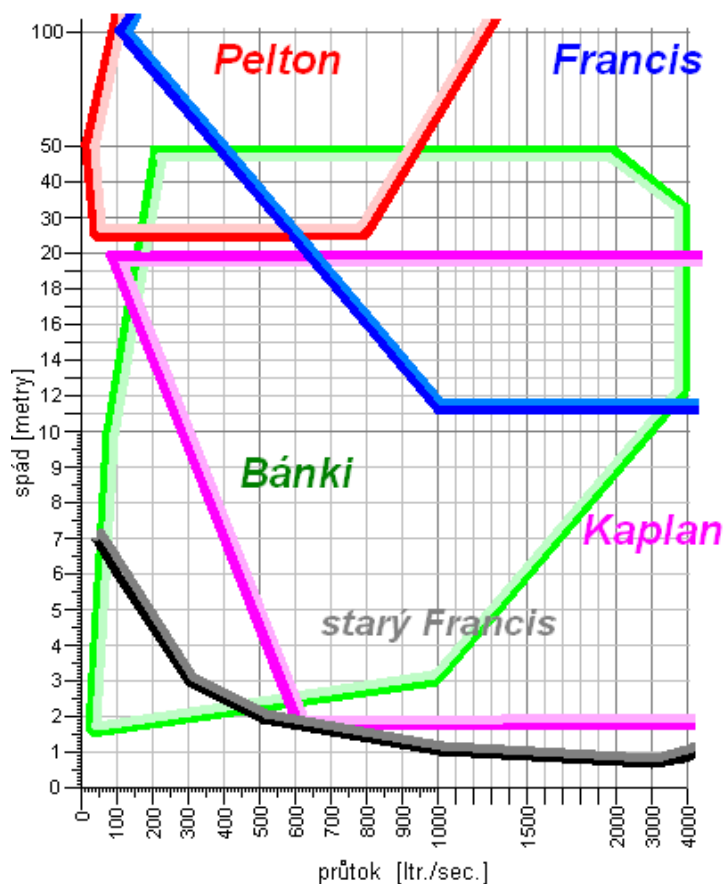
$$k_V = \frac{T}{8760} \text{ (-)} \quad (2.13)$$

3. STROJNÍ ČÁST MALÉ VODNÍ ELEKTRÁRNY

3.1 Volba turbíny podle spádu

Při projektování v hydroenergetice je možné volit z vodních turbín s různými výkony, rozměry a konstrukčním řešením. Při volbě typu turbíny a jejího provedení je třeba zohlednit konkrétní terén a hydrologické podmínky v dané lokalitě. Hlavní parametry pro volbu turbíny jsou průtok a spád. Na

obrázku 3.1 je Q/H diagram pro různé typy vodních turbín. V následující části jsou popsány pouze Kaplanova a Bánkiho turbína.



Obr. 3.1 Q/H diagram [4]

3.2 Turbíny

3.2.1 Kaplanova turbína

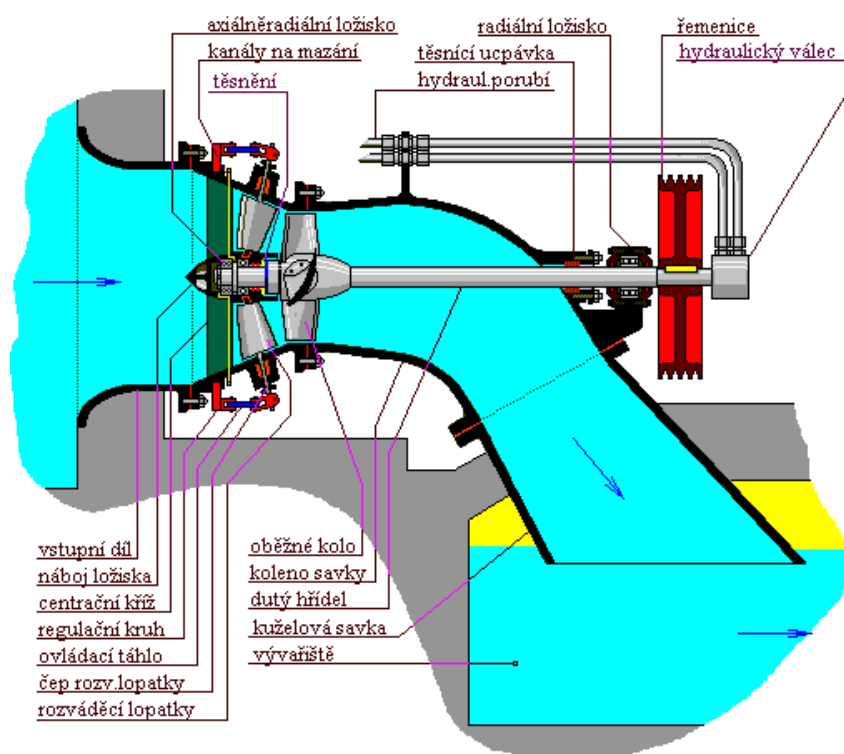
Na nově budovaných malospádových vodních elektrárnách patří Kaplanova turbína mezi nejčastěji používané hnací stroje. Bývá často montována i při rekonstrukci starších vodních děl, které byli původně osazeny Francisovou turbínou. Často pak díky širšímu regulačnímu rozsahu dosahuje lepšího využití toku. Používá se především u vodních děl jezových a také derivačních s otevřeným přivaděčem na menších spádech. Je určena výhradně pro pohon generátorů a to především asynchronních, ale díky své dobré regulovatelnosti je možné použití i generátoru synchronního a je ji možno použít pro dodávky elektřiny do samostatné sítě nebo jako záložní energetický zdroj.

Kaplanova turbína využívá spádů od 1,5 do cca 5,5 metrů a průtoků od 250 do 6000 litrů za sekundu. Nejčastěji se však používá na spádech od 2 do 4 metrů při průtocích od 500 do 3000 litrů za sekundu. Výhodou této přímoproudé turbíny je, že nepotřebuje žádnou kašnu ani hluboké vývařiště, a proto má malé náklady na stavební část. Díky vodorovně vyvedené hřídeli může být generátor umístěn

dostatečně vysoko, což ho často ochrání před zatopením. Savka turbíny musí být esovitě zahnutá a proto má o několik procent nižší účinnost než přímá savka. Převod ke generátoru je u menších turbín řemenový a u větších strojů realizovaný ozubeným soukolím v samostatné uzavřené převodovce. Přímou se turbína a generátor spojují pouze na větších spádech, kde kde je dosaženo dostatečně vysokých otáček.

Velkou výhodou řešení s Kaplanovou turbínou je to, že se jedná o kompaktní technologický blok a díky tomu se dosahuje malé stavební výšky, možnosti instalace do malých strojoven u jezových elektráren nebo v jezových pilířích. Nastavení a efektivní využití průtoku v širokém regulačním rozsahu umožňuje regulovatelný rozváděč ve spolupráci s regulací oběžného kola. Díky tomu lze téměř zastavit průtok strojem, a proto se před vstup do turbíny osazuje pouze havarijní uzávěr. Tím bývá nejčastěji stavidlo, u větších spádů klapka nebo hradicí deska.

Nevýhodou této turbíny je její značná mechanická složitost, vysoká cena a vyšší náklady na údržbu. Tento typ turbíny se proto doporučuje instalovat pouze na lokality, kde je dostatečný hydroenergetický potenciál.

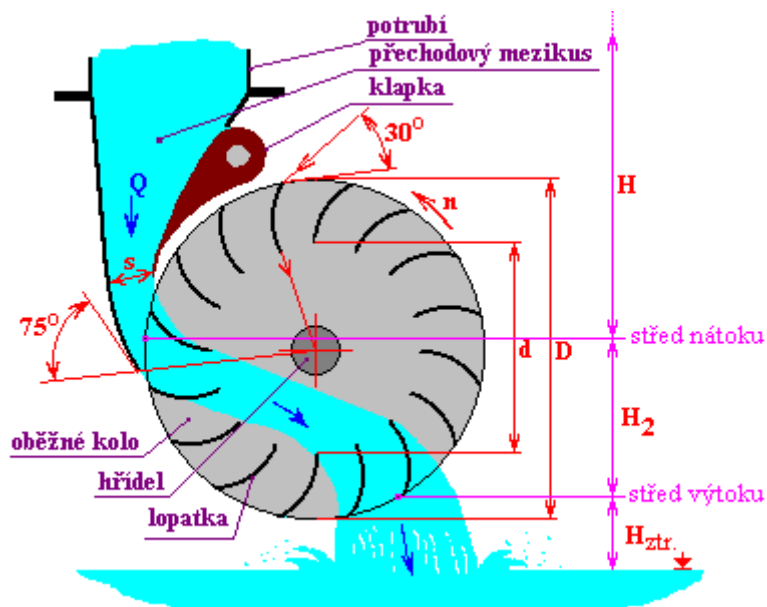


Obr. 3.2 Schéma uspořádání soustrojí s Kaplanovými turbínami [4]

3.2.2 Bánkiho turbína

Tato turbína využívá příčného dvojnásobného průtoku s parciálním ostřikem. První dostředivý průtok pracuje přetlakově nebo mezně, druhý odstředivý průtok je pouze rovnotlaký. Účinnost je 78 až 84%.

Tato turbína patří k finančně i technologicky nejlevnějším. Dokáže pracovat se spády od 1,5 metru až 30 metrů. Průtok turbínou se pohybuje mezi 20 až 2000 litry za sekundu.



Obr. 3.3 *Uspořádání Bánkiho turbíny* [4]

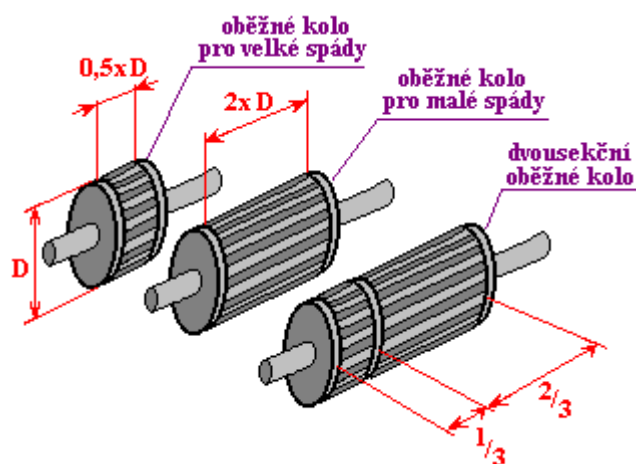
Turbína pracuje tak, že voda je přiváděna k turbíně potrubím kruhového průřezu. Tento průřez se v mezikusu před turbínou mění z kruhového průřezu na obdélníkový. Na konci tohoto vstupního dílu je klapka, která slouží jako regulační orgán. Ve štěrbině mezi zakřivenou stěnou a klapkou je celý spád vody přetransformován na pohybovou energii. Voda poté vstoupí do oběžného kola, které je hustě osazeno dlouhými lopatkami. Lopatky odklání směr tekoucí vody do středu oběžného kola. Změnou směru je způsobeno předání energie oběžnému kolu. Při prvním průtoku lopatkami se turbíně předává asi 79 % z celkového výkonu. Poté voda vstoupí do lopatek na protější straně oběžného kola. Zde opět změni směr a předává lopatkám zbylých 21 % své energie z celkového výkonu turbíny. Poté volně vytéká pod oběžné kolo. To umožňuje částečně využít i spád v oběžném kole. Ztracený spád je proto výškový rozdíl mezi oběžným kolem a spodní hladinou.

Tato turbína se využívá v mnoha aplikacích. Používá se zejména na malých tocích. Pro turbínu je však nutno zajistit činný spád nejméně 5krát až 10krát větší než je její průměr. Kvůli částečně ztracenému spádu je nutno přidat savku. Není vhodná v místech, kde hrozí vzestup spodní vody. Je preferována v lokalitách, kde bylo v minulosti kolo na horní vodu a také jako náhrada za Francisovu turbínu. Bánkiho turbína vykazuje dobrou účinnost v rozsahu od 30 do 100 % plnění.

Mezi její výhody patří:

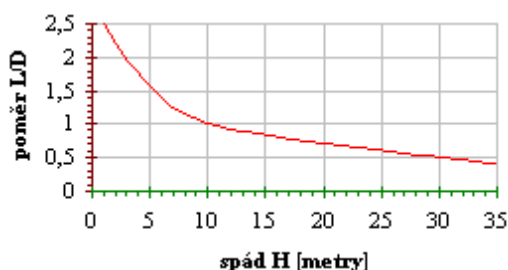
- návrh i realizace patří k nejjednodušším,
- výrazně okysličuje vodu,
- ve snadno a rychle regulovatelná,
- mimo uzavírací orgán je tato turbína podstatně méně citlivá na nečistoty,
- je odolná proti abrazi pískem,
- změna jejího zatížení má pouze nepatrný vliv na průtok,
- může běžet bez zatížení,
- není náchylná ke kavitaci,
- ložiska jsou mimo vodu, takže je možno pracovat i s pitnou vodou bez nebezpečí jejího znečištění,
- hřídel není nutné těsnit,
- vhodnou volbou šířky kola nebo dělením do více sekcí ji lze téměř libovolně přizpůsobit hydrologickým podmínkám lokality.

Pro stanovení rozměrů turbíny je nejdůležitější zvolit vhodný poměr mezi šířkou L oběžného kola (délkou lopatky) a jeho průměrem D . Tento poměr L/D nazveme součinitelem k_{ld} , je omezený pevností lopatky a proto je závislý na velikosti spádu.



Obr. 3.4 Poměry délky a šířky pro různé spády [4]

Dle spádu určíme z následujícího grafu vhodná poměr L/D :



Obr. 3.5 Graf poměrů délky a šířky pro různé spády [4]

Na levé straně grafu se odečte hodnota součinitele k_{ld} pro konkrétní provozní spád. Ze činného spádu se vypočítá vstupní rychlost vody c_1 .

$$c_1 = g \cdot \sqrt{19,81 \cdot H} \text{ (m} \cdot \text{s}^{-1}\text{)} \quad (3.1)$$

Tuto rychlost c_1 spolu s požadovanou hltností stroje Q dosadíme do vzorce pro plochu štěrbiny a :

$$a = \frac{Q}{1000 \cdot c_1} \text{ (m}^2\text{)} \quad (3.2)$$

Z této plochy a , součinitele k_{ld} a součinitele ostříku $k_{ostř}$ vypočítáte největší otevření štěrbiny s . Součinitel ostříku si můžete zvolit. Starší stroje měli mezi 0,05 a 0,1, současné moderní turbíny používají ostřík až 0,3:

$$s = 1000 \cdot \sqrt{\frac{a \cdot k_{ostř}}{k_{ld}}} \text{ (mm)} \quad (3.3)$$

Ze získaných hodnot vypočítáme vnější průměr oběžného kola D :

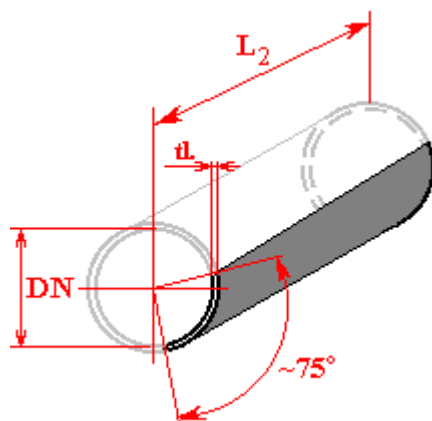
$$D = \frac{s}{k_{ostř}} \text{ (mm)} \quad (3.4)$$

Následně vypočteme vnitřní průměr d_2 na kterém končí vnitřní hrana lopatek:

$$d_2 = D \cdot 0,66 \text{ (mm)} \quad (3.5)$$

Štěrbina bude mít délku L přičemž vlastní lopatka a tedy i vzdálenost mezi disky oběžného kola L_2 by měla být o 5 až 15 mm větší:

$$L = D \cdot k_{ld} \text{ (mm)} \quad (3.6)$$



Obr.3.6 Náčrtek lopatky [4]

Světlost DN této lopatky (vnitřní průměr) se vypočítá z vnějšího průměru oběžného kola turbíny D a síly stěny tl , která se pohybuje od 3,5 do 8 mm podle délky lopatky a jejího namáhání:

$$DN = 0,326 \cdot D - 2 \cdot tl \text{ (mm)} \quad (3.7)$$

Jmenovité otáčky turbíny n vycházejí z průměru D a vstupní rychlosti vody c_1 , přičemž naprázdno se turbína rozběhne na otáčky 1,8krát vyšší:

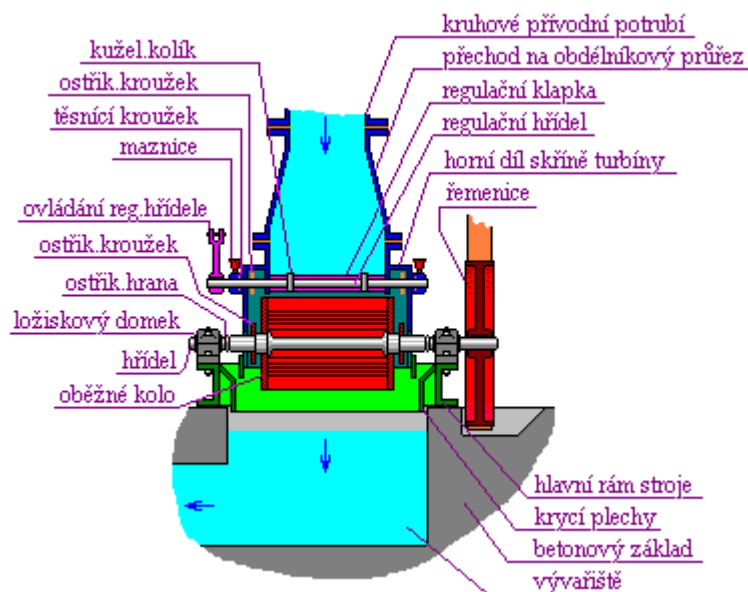
$$n = 9898 \cdot \frac{c_1}{D} \text{ (ot} \cdot \text{min}^{-1}\text{)} \quad (3.8)$$

A nakonec vypočteme přibližný průměr hřídele d_h ten lze vypočítat ze vzorce:

$$d_h = 160 \cdot \sqrt[3]{\frac{H \cdot Q}{75 \cdot n}} \text{ (mm)} \quad (3.9)$$

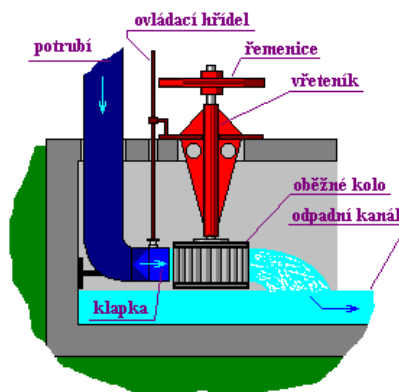
Pokud je tok velmi proměnný, je vhodné oběžné kolo turbíny rozdělit na dvě různě dlouhé sekce. Ve většině případů se používá rozdělení v poměru $1/3$ a $2/3$ tak, aby délka větší sekce vyhovovala součiniteli k_{id} pro daný spád H . Pro každou sekci se instaluje samostatně ovládaná klapka. Při plném průtoku pracují obě části turbíny současně. Při úbytku vody se přivírá nejprve klapka úzké části a to tak dlouho, dokud není malá sekce zcela uzavřena. Poté pracuje pouze velká. To nastane při 66 % hltnosti Q . Pokud průtok stále klesá začne se zavírat i klapka širší části. Jakmile dojde k jejímu uzavření asi na polovinu, *zavře* se úplně a současně se zcela otevře klapka menší části. To nastane, když průtok poklesne na 33 % hltnosti Q . Veškerý zbývajících průtok převezme úzká část turbíny, protože při uzavření klapky začne široká část pracovat s horší účinností. Malou sekci je možno stále uzavírat až do hodnoty 16 % jmenovité hltnosti Q celé turbíny. Při tomto zavření poklesne už účinnost turbíny natolik, že je lépe pracovat v cyklickém režimu.

Na průřezu Bánkiho turbínou lze vidět, že se skládá ze základového rámu, v němž jsou uloženy ložiska, a který přesně přiléhá na otvor v podlaze. V ložiscích se otáčí hřídel s připevněným oběžným kolem opatřeným i soustavou ostřikových kotoučů bránících tomu, aby se voda dostala do ložisek. Shora na rámu je připevněn kryt oběžného kola, který zajišťuje správný směr přítoku vody do oběžného kola. Tento kryt chrání i hřídel s regulační klapkou. Mezi klapkou a průchodem hřídele není těsnění. Pryžový ostřikový kroužek pouze omezuje přímý vstřík vody a nečistot do ložiska hřídele, těsnicí kroužek uvnitř pouzdra brání vnikání vody.



Obr. 3.7 Řez turbínou [4]

Pokud je použita nízká hodnota součinitele k_{ld} není vyloučena vertikální montáž turbíny. Díky tomu je generátor dobře chráněn před zatopením.



Obr. 3.8 Řez turbínou [4]

Pro spády menší než 2 metry se Bánkiho turbína většinou nestaví. Výkon oběžného kola limituje pevnost nepodepřené délky lopatky a ohyb hřídele. Větší průtok je nutné rozdělit na více strojů nebo použít přetlakové turbíny s velkou hltností.

3.3 Kavítace

Kavítace je vznik dutin v kapalině při lokálním poklesu tlaku, následovaný jejich implozí. Pokles tlaku může být důsledkem lokálního zvýšení rychlosti (hydrodynamická kavítace), případně průchodu intenzivní akustické vlny v periodách zředění (akustická kavítace). Kavítace je zpočátku vyplněna vakuem, později se vyplní párou okolní kapaliny nebo do ní mohou difundovat plyny z okolní kapaliny. Při vymizení podtlaku, který kavítaci vytvořil, její bublina kolabuje za vzniku rázové vlny

s destruktivním účinkem na okolní materiál. Kavitace vzniká například na lopatkách lodních šroubů, turbín, na čerpadlech a dalších zařízeních, která se velkou rychlostí pohybují v kapalině. Kavitace způsobuje hluk, snižuje účinnost strojů, zvyšuje působení koroze a může způsobit i jejich mechanické poškození.

Na vznik kavitace má vliv především velikost podtlaku, soudržnost (povrchové napětí) kapaliny a teplota, přičemž čím je teplota nižší, tím menší je kavitace. K omezení účinků kavitace, je nutno zvolit správnou výšku sací trouby a použít při výrobě turbínových lopatek správného materiálu odolného proti rázu. Také přesnost opracování turbínových lopatek má vliv na odolnost proti kavitaci povrch lopatek by, proto měl být co nejjemnější.

3.4 Savky přetlakových turbín

Sací roura nebo zkráceně savka je pojmem vyskytujícím se většinou v souvislosti s přetlakovými turbínami. U turbín rovnotlakých mluvíme o odpadním potrubí. Pouze tehdy, je-li za oběžným kolem sloupce vody vytvořený podtlak, hovoříme o savce. Díky savce je možno umístit turbínu téměř v libovolné výšce nad spodní hladinou (až do mezí daných kavitací). Stroj tak může být snáze přizpůsobený potřebám provozovny i dané lokality. Často odpadají složité převody a částečně se eliminuje nebezpečí zatopení strojovny. Savky se vyplatí použít zejména u zmenšujících se spádů. U vodní elektrárny s malým spádem můžeme v savce využít 30 až 50 % energie vody.

3.5 Převody

Převody jsou důležitou částí vodní elektrárny. U velkých elektráren bývá nejčastěji hřídel turbíny přímo spojena s generátorem, který bývá konstruován na otáčky turbíny. V malých vodních elektráren bývá obvykle instalován asynchronní motor s velkými otáčkami. Proto je nutné, pro spojení hřídele turbíny a generátoru, použít rychlý převod

3.5.1 Ozubená soukolí

Ozubená soukolí se používala u starších vodních elektráren s malým spádem. Nejčastěji se používají ozubení čelní nebo kuželová. Při použití čelního ozubení, je soukolí rovnoběžné. Na ozubení můžou být použity zuby přímé, šikmé a šípové. Účinnost je závislá na druhu ozubení, přesnosti výroby, drsnosti povrchu a na opotřebení. Hodnota účinnosti se u čelních a kuželových ozubení je až okolo 97 %, u hypoidních ozubení 94 až 96 %. Na jednom stupni lze dosáhnout převodu 1 : 8 až 1 : 10.

3.5.2 Řemenové převody

Patří mezi nejrozšířenější převody. Protože existuje řada technologických zařízení, v nichž se řemeny používají, je zajištěna relativně vysoká technická úroveň jejich výroby. Podle konstrukce se dělí na ploché, klínové a ozubené řemeny. Ploché řemeny dosahují převodu až 1 : 15. Maximální

obvodová rychlost řemenů je 70 m.s^{-1} . Účinnost se nachází v rozmezí 96 až 98 %. Klínové řemeny jsou náročnější na přesnost výroby. Musí se vyměňovat vždy celá sada řemenů, protože při provozu dochází k jejich postupnému protahování.

Výhodnější je použití násobných klínových řemenů, jejichž obvodová rychlost je přibližně 40 až 60 m.s^{-1} . Maximální převodový poměr je 1 : 10 a účinnost 98 %. Nejlepším řešením jsou ozubené řemeny. Ty jsou vhodné i pro použití při výkonech kolem 300 kW a účinnost je až 99 %.

3.5.3 Řetězové převody

Řetězové převody mají nejmenší nároky na stavební prostor. V hydroenergetice se nejčastěji používají článkové řetězy jednořadé a víceřadé. Jednořadé řetězy lze použít jen při vodorovné poloze os ozubených kol, zatímco víceřadé řetězy i ve vertikální poloze hřídelí ozubených kol. Počet článků řetězů je vždy sudý. Účinnost těchto převodů je až 98,5 %, ale je závislá na mazání a počtu zubů. Řetězové převody lze použít pro výkony až 5000 kW.

3.6 Uzávěry

Uzávěrů, které jsou pro MVE k dispozici, existuje velký počet. Jsou členěny podle charakteru provozu, podle funkce, podle konstrukce a podle velikosti tlaku, jemuž musí vzdorovat. Přehled členění je uveden v tabulce 3.1.

Tab. 3.1. Členění uzávěrů [5]

Podle charakteru provozu	regulační neregulační
Podle funkce na díle	provozní rychlouzávěry
Podle konstrukce	stavidlové hradidlové hradlové klapkové klínové válcové segmentové
Podle velikosti tlaku vody	trubní tlakové kanálové o volné hladině

4. ELEKTRICKÁ ČÁST MALÉ VODNÍ ELEKTRÁRNY

4.1 Generátory

V malých vodních elektrárnách se k výrobě v naprosté většině případů používají asynchronní nebo synchronní generátory. Volba elektrického napětí generátoru U je závislá na velikosti výkonu P . Níže jsou uvedeny orientačně napěťové hladiny pro jednotlivé rozmezí výkonů.

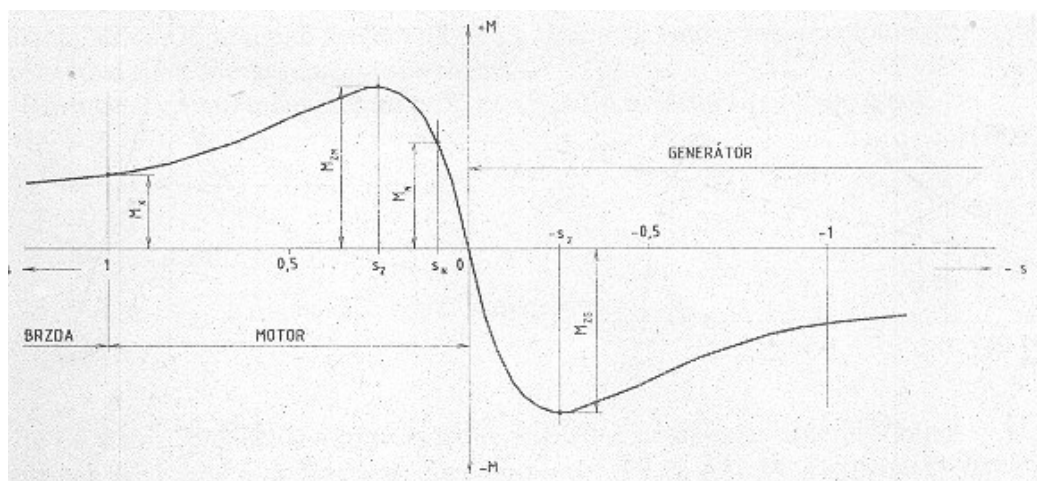
Tab. 4.1. *Jmenovité napětí a výkony generátorů [6]*

U (V)	400	3000	6000
P (kW)	do 1500	1500 až 2500	nad 2500

4.1.1 Asynchronní generátor

Používá se především v režimu výroby a dodávky elektrické energie malé vodní elektrárny do pevné sítě. U samostatného provozu do autonomní sítě se asynchronní generátor nepoužívá. Stator asynchronního generátoru má trojfázové střídavé vinutí, stejně jako synchronní stroje. Rotor může být vinutý s kroužky nebo se dá použít rotor s klecovým vinutím. Při přivedení trojfázového napětí na svorky statoru vznikne točivé magnetické pole, které v rotorovém vinutí indukuje proudy, jejichž silovými účinky se rotor otáčí ve směru točení magnetického pole a stroj se chová jako motor. Když rotor dosáhne synchronních otáček s magnetickým polem, nic se neindukuje. Proto se rotor v motorovém chodu otáčí s otáčkami o něco nižšími, než jsou otáčky synchronní – pracuje se skluzem. Při zvýšení otáček rotoru nad otáčky magnetického pole bude rotor do sítě dodávat činný výkon. Ze sítě však bude odebírat jalový výkon pro svou magnetizaci.

Princip asynchronního generátoru se neliší od běžného asynchronního motoru. U malé vodní elektrárny je asynchronní generátor mechanicky spojen s turbínou. Někteří výrobci respektují rozdílné napěťové poměry asynchronního stroje při generatorickém chodu a v tom případě je stroj označován v katalogu jako asynchronní generátor. Pokud asynchronní stroj pracuje v generatorické oblasti, potom je hodnota skluzu menší než nula, což lze vyčíst z následujícího obrázku.



Obr. 4.1 Momentová charakteristika [7]

Tyto stroje se mohou mít rozdílné provedení, nejčastěji jsou používány asynchronní stroje s kotvou nakrátko, jen v některých případech jsou používány stroje s vinutým rotorem (kroužkový stroj. Motory se vyrábí s různým počtem pólů. Další parametry jsou například výkon, krytí, uchycení, chlazení, účinník atd.

4.1.2 Synchronní generátor

Stator synchronního stroje se příliš neliší od statoru asynchronního stroje a obsahuje trojfázové vinutí, které je umístěno v drážkách. Na rotoru je pak umístěno budicí vinutí napájené přes sběrací kroužky a kartáče stejnosměrným proudem. U vodních elektráren se používají stroje s vyniklými póly. Stroje s vyniklými póly mají cívký budicího vinutí nasazené na pólech, na jejichž koncích jsou připevněny pólové nástavce. Póly jsou zhotovené buď z dynamových plechů a nebo jsou masivní ocelolitinové a pouze pólové nástavce jsou z dynamových plechů. Synchronní motory s permanentními magnety mají místo budicího vinutí na rotoru permanentní magnety. Krokové motory mají vyniklé póly na statoru, na kterých jsou umístěny cívký vinutí. Reluktanční motory nemají na rotoru žádné vinutí ani permanentní magnety a rotor je složen pouze z vhodně tvarovaných plechů.

Statorové vinutí dvojpólového alternátoru tvoří tři cívký vzájemně prostorově natočené o 120° . Rotorovým vinutím prochází stejnosměrný proud, který vybudí stejnosměrné magnetické pole, které se uzavírá přes stator. Otáčí-li se poháněcí stroj, takto nabuzeným rotorem, indukují se v jednotlivých cívkách statoru střídavá napětí, sinusového průběhu, která jsou v jednotlivých cívkách vzájemně časově posunutá o úhel 120° .

4.2 Silnoprúdová zařízení MVE

Tato zařízení slouží k přenosu, transformaci, spínání a jištění vyráběné elektrické energie, ale také k napájení pohonů a ostatních elektrických zařízení zahrnutých do vlastní spotřeby MVE. K rozvodu výkonu z MVE je určena přípojka venkovním nebo kabelovým vedením, která může být na úrovni nízkého napětí (3 x400 V) nebo, v případě vyšších výkonů a větší vzdálenosti, vysokého napětí (22 a 35 kV).

Elektrická přípojka je ukončena v hlavní rozvodné skříní nebo v případě vysokého napětí v rozvodně vysokého napětí. Pokud se pro MVE použije více napěťových úrovní, je nutno použít transformátory. Generátory jsou k transformátoru připojeny blokově nebo je transformátor společný pro více generátorů. Blokované zapojení je určeno pro připojení vn generátorů 6,3kV k síti 22kV. Zapojení se společným transformátorem je vhodnější ke spolupráci generátorů nn s vn sítí.

4.3 Vlastní spotřeba malé vodní elektrárny

Vlastní spotřeba se dělí na střídavou a stejnosměrnou. U vodních elektráren je tato spotřeba, v porovnání s tepelnými a jadernými elektrárnami, malá. Pokud pracuje generátor MVE s nízkým napětím, může být tato spotřeba napojena přímo. Jestliže je na vývodu z elektrárny vysoké napětí, musíme napětí transformovat na nižší napěťovou hladinu a až po této transformaci můžeme napojit na vlastní spotřebu. Vlastní spotřeba je většinou napájena napětím označovaným jako 400 V/230 V, 50 Hz. Hlavními složkami stejnosměrné vlastní spotřeby jsou v malých vodních elektrárnách především ovládací obvody, dobíjení baterií a napájení budících vinutí. Základní parametr tohoto rozvodu je jmenovité napětí baterie, které se nejčastěji používá pro napětí 24 V, popřípadě 110 V.

5. NÁVRH MALÉ VODNÍ ELEKTRÁRNY

Pro návrh malé vodní elektrárny je důležité znát hydrologické podmínky dané lokality. Dle tabulky 5.1, v níž jsou zaznamenány čisté spády Q_v a čisté spády H , je sestavena odtoková křivka. Jak je patrné z tabulky 5.1, čistý spád není konstantní, ale je ovlivňován vzdouváním spodní hladiny. Údaje pro odtokovou křivku byly získány u státního podniku Povodí Moravy.

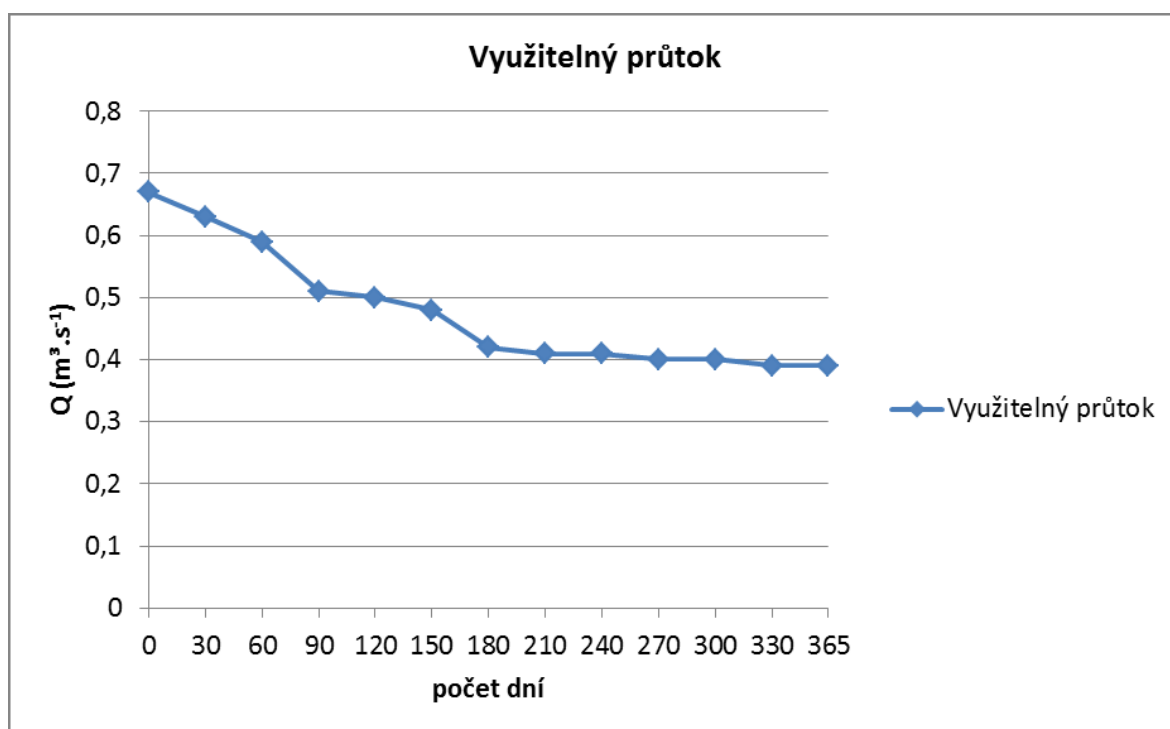
Tab. 5.1 Odtoková křivka v daném úseku vodního toku

Počet dní	Průtok Dyje (m^3/s^{-1})	Spád (m)	Využitelný průtok (m^3/s^{-1})	Výkon (kW)
0	28,2	1,6	0,67	10,51
30	23,5	1,9	0,63	11,74
60	19	2,1	0,59	12,16
90	11,1	2,3	0,51	11,5
120	10,2	2,3	0,5	11,28
150	8,1	2,4	0,48	11,3
180	4,5	2,5	0,42	10,3
210	4,4	2,5	0,41	10,06
240	4,3	2,5	0,41	10,06
270	4,1	2,5	0,4	9,81
300	3,1	2,5	0,4	9,81
330	2,2	2,6	0,39	9,95
365	2,1	2,6	0,39	9,95

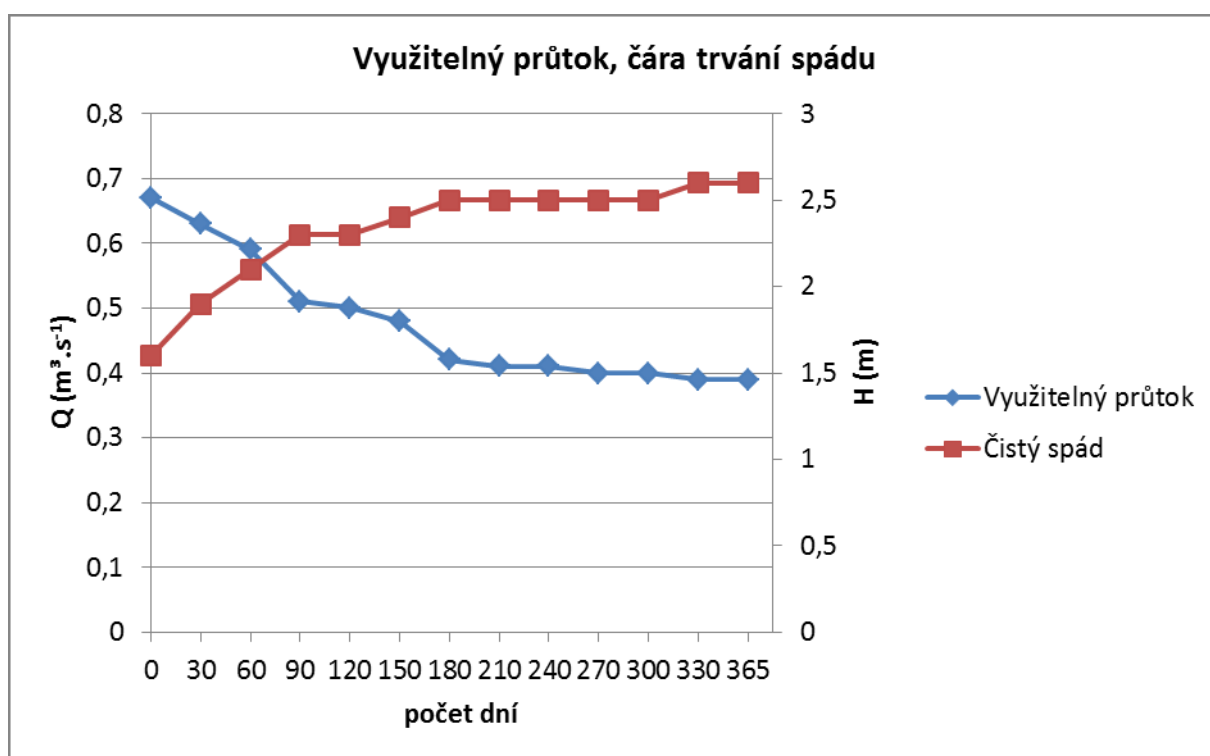
Vypočtené hodnoty (pro vyznačený řádek):

Teoretický výkon:

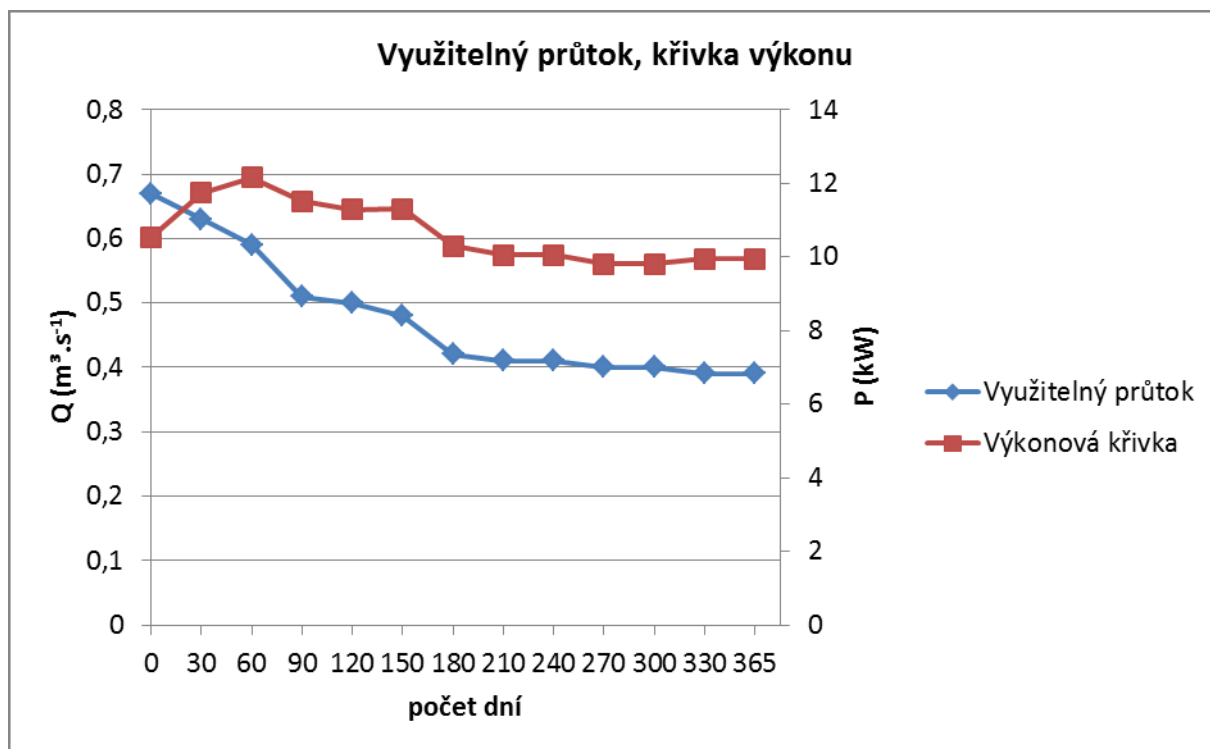
$$P = \rho \cdot g \cdot Q_v \cdot H = 1000 \cdot 9,81 \cdot 0,42 \cdot 2,5 = 10,3 \text{ kW}$$



Obr. 5.1 Odtoková křivka



Obr. 5.2 Využitelný průtok, čára trvání spádu



Obr. 5.3 Využitelný průtok, křivka výkonu

5.1. Výpočet teoretického výkonu, teoretické energie vodního toku

Tab. 5.2 Výpočet teoretického výkonu, teoretické energie

Interval	Počet dní	$H_{\text{stř}}$ (m)	$Q_{\text{vstř}}$ (m^3/s^{-1})	$P_{\text{t,v}}$ (kW)	$A_{\text{t,v}}$ (kWh)
0-30	720	1,75	0,65	11,16	8034,39
30-60	720	2	0,61	11,97	8617,1
60-90	720	2,2	0,55	11,87	8546,47
90-120	720	2,3	0,505	11,39	8203,91
120-150	720	2,35	0,49	11,3	8133,28
150-180	720	2,45	0,45	10,82	7787,18
180-210	720	2,5	0,415	10,18	7328,07
210-240	720	2,5	0,41	10,06	7239,78
240-270	720	2,5	0,405	9,93	7151,49
270-300	720	2,5	0,4	9,81	7063,2
300-330	720	2,55	0,395	9,88	7114,41
330-365	840	2,6	0,39	9,95	8355,77
Energie celkem:					93575,04

Vypočtené hodnoty (pro vyznačený řádek):

Střední průtok:

$$Q_{vstř} = \frac{Q_0 + Q_{30}}{2} = \frac{0,67 + 0,63}{2} = 0,65 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$$

Střední spád:

$$H_{stř} = \frac{H_0 + H_{30}}{2} = \frac{1,6 + 1,9}{2} = 1,75 \text{ m}$$

Výkon teoreticky využitelný:

$$P_{T,V} = \rho \cdot g \cdot Q_{Vstř} \cdot H_{stř} = 1000 \cdot 9,81 \cdot 0,65 \cdot 1,75 = 11,16 \text{ kW}$$

Teoreticky využitelná energie:

$$A_{T,V} = P_{T,V} \cdot T = 11,16 \cdot 720 = 8034 \text{ kWh}$$

Volba turbíny je provedena na základě zadané odtokové křivky, která je v tabulce 5.1. Z tabulky je patrné, že spády jsou přibližně 2,5 metrů. Z Q/H diagramu vyplývá, že nejlepší typy turbíny pro zadanou odtokovou křivku jsou Kaplanova a Bánkiho turbíny.

5.2. Varianta s Bánkiho turbínou

5.2.1. Turbína

$$H=2,5 \text{ m}$$

$$Q=0,42 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$$

$$n=256 \text{ ot} \cdot \text{min}^{-1}$$

Maximální průtok turbínou:

$$Q_{\max}=1,1 \cdot Q=0,4625 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$$

Minimální průtok turbínou:

$$Q_{\min}=0,16 \cdot Q=0,067 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$$

5.2.2. Výpočet instalovaného výkonu

Maximální průtok turbínou:

$$Q=0,4625 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$$

Celková účinnost:

$$\eta_c = \eta_t \cdot \eta_p \cdot \eta_g \cdot \eta_{tr} = 0,78 \cdot 0,98 \cdot 0,85 \cdot 0,98 = 0,64$$

Maximální výkon na prahu MVE:

$$P = 9,81 \cdot Q \cdot H_{stf} \cdot \eta_c = 9,81 \cdot 0,4625 \cdot 2,5 \cdot 0,64 = 7,22 \text{ kW}$$

Instalovaný výkon MVE:

$$P_i = 0,95 \cdot P = 0,95 \cdot 7,22 = 6,86 \text{ kW}$$

5.2.3. Výpočet množství vyrobené elektrické energie

Tab. 5.3 Výpočet množství elektrické energie

Interval	Počet dní	H_{stf} (m)	Q_v (m^3/s^{-1})	P (kW)	A (kWh)
0-30	720	1,75	0,4625	5,08	3658,74
30-60	720	2	0,4625	5,81	4181,41
60-90	720	2,2	0,4625	6,39	4599,56
90-120	720	2,3	0,4625	6,68	4808,63
120-150	720	2,35	0,4625	6,82	4913,16
150-180	720	2,45	0,45	6,92	4983,79
180-210	720	2,5	0,415	6,51	4689,96
210-240	720	2,5	0,41	6,44	4633,46
240-270	720	2,5	0,405	6,36	4576,95
270-300	720	2,5	0,4	6,28	4520,45
300-330	720	2,55	0,395	6,32	4553,22
330-365	840	2,6	0,39	6,37	5347,69
Energie celkem:					55467,03

Vyšší průtoky než je maximální průtok turbínou $Q_{\max} = 0,4625 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ nelze využít, proto nejsou tyto vyšší průtoky uváděny.

Vypočtené hodnoty (pro vyznačený řádek):

Výkon MVE:

$$P = 9,81 \cdot Q \cdot H_{stf} \cdot \eta_c = 9,81 \cdot 0,415 \cdot 2,5 \cdot 0,64 = 6,51 \text{ kW}$$

Využitelná energie:

$$A = P \cdot T = 6,51 \cdot 720 = 4689,96 \text{ kWh}$$

Doba ročního využití instalovaného výkonu:

$$T = \frac{A}{P_i} = \frac{55467,03}{6,86} = 8085 h$$

Koeficient ročního využití malé vodní elektrárny:

$$k_v = \frac{T}{8760} = \frac{8085}{8760} = 0,92$$

5.3. Varianta s Kaplanovou turbínou

5.3.1. Turbína

$$H = 2,5 \text{ m}$$

$$Q = 0,42 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$$

Maximální průtok turbínou:

$$Q_{\max} = 1,2 \cdot Q = 0,504 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$$

Minimální průtok turbínou:

$$Q_{\min} = 0,9 \cdot Q = 0,378 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$$

5.3.2. Výpočet instalovaného výkonu

Maximální průtok turbínou:

$$Q = 0,504 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$$

Celková účinnost:

$$\eta_c = \eta_t \cdot \eta_p \cdot \eta_g \cdot \eta_{tr} = 0,84 \cdot 0,98 \cdot 0,85 \cdot 0,98 = 0,69$$

Maximální výkon na prahu MVE:

$$P = 9,81 \cdot Q \cdot H_{stř} \cdot \eta_c = 9,81 \cdot 0,504 \cdot 2,5 \cdot 0,69 = 8,48 \text{ kW}$$

Instalovaný výkon MVE:

$$P_i = 0,95 \cdot P = 0,95 \cdot 8,48 = 8,05 \text{ kW}$$

5.3.3. Výpočet množství vyrobené elektrické energie

Tab. 5.4 Výpočet množství elektrické energie

Interval	Počet dní	$H_{stř}$	Q_v	P	A
		(m)	(m ³ /s ⁻¹)	(kW)	(kWh)
0-30	720	1,75	0,504	5,97	4298,5
30-60	720	2	0,504	6,82	4912,6
60-90	720	2,2	0,504	7,512	5403,86
90-120	720	2,3	0,504	7,85	5649,49
120-150	720	2,35	0,504	8,02	5772,3
150-180	720	2,45	0,45	7,46	5373,15
180-210	720	2,5	0,415	7,02	5056,37
210-240	720	2,5	0,41	6,94	4995,45
240-270	720	2,5	0,405	6,85	4934,53
270-300	720	2,5	0,4	6,77	4873,61
300-330	720	2,55	0,395	0	0
330-365	840	2,6	0,39	0	0
Energie celkem:					51269,869

Vyšší průtoky než je maximální průtok turbínou $Q_{max} = 0,504 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ nelze využít, proto nejsou tyto vyšší průtoky uváděny. S hodnotami blížíícími se minimálnímu průtoku $Q_{min} = 0,378 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ nelze počítat.

Vypočtené hodnoty (pro vyznačený řádek):

Výkon MVE:

$$P = 9,81 \cdot Q \cdot H_{stř} \cdot \eta_c = 9,81 \cdot 0,415 \cdot 2,5 \cdot 0,69 = 7,02 \text{ kW}$$

Využitelná energie:

$$A = P \cdot T = 6,51 \cdot 720 = 5056,37 \text{ kWh}$$

Doba ročního využití instalovaného výkonu:

$$T = \frac{A}{P_i} = \frac{51269,869}{6,86} = 7473 \text{ h}$$

Koeficient ročního využití malé vodní elektrárny:

$$k_v = \frac{T}{8760} = \frac{7473}{8760} = 0,85$$

5.4. Generátor

Pro výrobu elektrické energie je vhodné použít asynchronní generátor. Vhodný sériově vyráběný asynchronní generátor s kotvou nakrátko má tyto vlastnosti:

$$P_n = 6,5 \text{ kW}$$

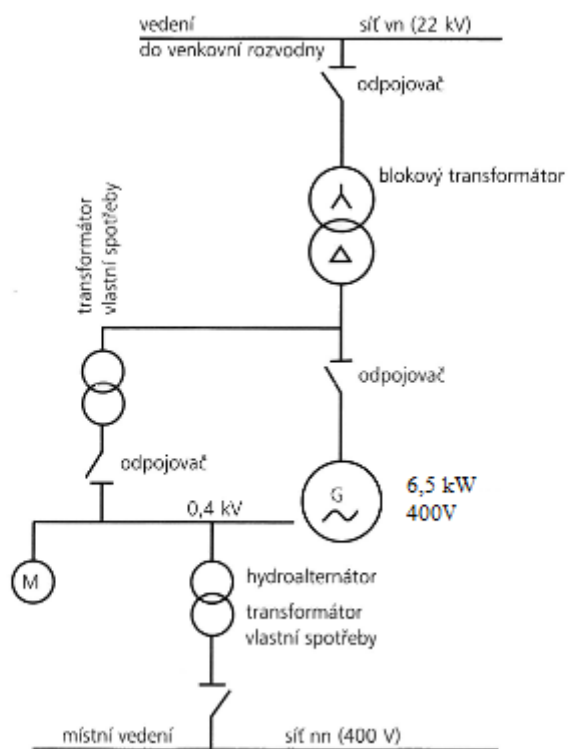
$$U_N = 400 \text{ V}$$

$$I_N = 13,6 \text{ A}$$

$$n = 1450 \text{ ot.min}^{-1}$$

$$\eta_g = 85\%$$

5.5. Elektrické schéma MVE



Obr. 5.1 Elektrické schéma MVE [9]

5.6. Připojení MVE k rozvodné síti

Elektrická energie z malé vodní elektrárny bude vyvedena přímo na místní distribuční síť 22 kV. Vzhledem k tomu, že zvolený asynchronní generátor má napětí 400 V, je nejvhodnější použít transformátor s převodovým poměrem 0,4/22 kV.

6. Návrh malých vodních elektráren

6.1. Investiční náklady na výstavbu MVE

Výpočet investičních nákladů pro MVE stanovuje vyhláška č.475/2005 Sb. a její novely, které obsahují některá ustanovení zákona o podpoře využívání obnovitelných zdrojů. Doba životnosti se předpokládá 30 let. Měrné investiční náklady a roční využití instalovaného výkonu zdroje jsou uvedeny v tab. 6.1.

Tab. 6.1 Měrné investiční náklady a roční využití instalovaného výkonu zdroje [13]

Celkové měrné investiční náklady	Roční využití instalovaného výkonu
$Kč.kW_e^{-1}$	$kWh.kW_e^{-1}$
< 145000	> 4000

Celkové investiční náklady pro variantu s Bánkiho turbínou:

$$N = N_{inv} \cdot P_i = 145000 \cdot 6,86 = 994\,700 \text{ Kč}$$

Celkové investiční náklady pro variantu s Kaplanovou turbínou:

$$N = N_{inv} \cdot P_i = 145000 \cdot 8,05 = 1\,167\,250 \text{ Kč}$$

6.2. Doba návratnosti investic

Dobu návratnosti je počet let, za který se navrátí finance vložené do realizace projektu. Investice je tím výhodnější, čím je doba splatnosti kratší. Dobu návratnosti určíme jako poměr investičních nákladů k zisku za prodanou elektrickou energii. Výkupní cena elektrické energie je 3 230 Kč. MWh⁻¹ podle cenových informací ERÚ pro rok 2013.

Roční zisk pro variantu s Bánkiho turbínou:

$$Z_r = \text{výkupní cena} \cdot A_S = 3,23 \cdot 55467,03 = 179\,158 \text{ Kč}$$

Doba návratnosti pro variantu s Bánkiho turbínou:

$$T = \frac{N}{Z_r} = \frac{994\,700}{179\,158} = 5,65 \text{ let}$$

Roční zisk pro variantu s Kaplanovou turbínou:

$$Z_r = \text{výkupní cena} \cdot A_s = 3,23 \cdot 51269,869 = 165\,601 \text{ Kč}$$

Doba návratnosti pro variantu s kaplanovou turbínou:

$$T = \frac{N}{Z_r} = \frac{1\,167\,250}{165\,601} = 7,05 \text{ let}$$

6.3. Dotace

V současné době je nejvýhodnější Operační program OPPI, který je z 85 % spolufinancován z Evropského fondu regionálního rozvoje (ERDF) a z 15 % ze státního rozpočtu. Správcem programu je Ministerstvo průmyslu a obchodu a zprostředkující subjekt je CZECHINVEST. Součástí programu OPPI je program EKO – ENERGIE, který je určen pro podporu využití obnovitelných a druhotných zdrojů energie včetně fotovoltaických, geotermálních a větrných elektráren a zvyšování účinnosti při výrobě a spotřebě energie. V rámci programu EKO – ENERGIE je maximální výše dotace na MVE 40 % z celkových investičních nákladů.

7. Závěr

V této bakalářské práci je zpracován teoretický rozbor hydroenergetického řešení malé vodní elektrárny, který zahrnuje hydroenergetický potenciál vodního toku, základní parametry hydroenergetického díla, dělení vodních elektráren podle spádu a způsobu provozu a řešení průběžné vodní elektrárny. Poté je v teoretické části proveden rozbor strojní části malé vodní elektrárny, ve kterém jsou popsány turbíny, savky přetlakových turbín, převody a uzávěry. Nakonec je v teoretické části proveden rozbor elektrické části malé vodní elektrárny, který obsahuje popis generátorů, silnoproudá zařízení a vlastní spotřeby malé vodní elektrárny.

Ve výpočtové části bakalářské práce je vycházeno z odtokové křivky daného vodního toku, která je uvedena v tab. 5.1 a byla poskytnuta Státním podnikem Povodí Moravy. Z tabulky odtokové křivky byly vypracovány grafy využitelného průtoku, čáry trvání spádu a křivky výkonu. V tab. 5.2 jsou uvedeny vypočtené hodnoty teoretického výkonu a teoretické energie a suma celkové vyrobené elektrické energie $\sum A_{T,C} = 93575,04 \text{ kWh}$. Maximální teoretický využitelný výkon turbíny je $P_{T,V} = 11,16 \text{ kW}$.

V této práci jsou zpracovány varianty malé vodní elektrárny s Bánkiho a Kaplanovou turbínou. S Bánkiho turbínou má malá vodní elektrárna instalovaný výkon $P_i = 6,86 \text{ kW}$ a roční vyrobená elektrická energie je $\sum A = 55467,03 \text{ kWh}$. Druhá varianta je navržena s Kaplanovou turbínou, její instalovaný výkon $P_i = 8,05 \text{ kW}$ a roční vyrobená elektrická energie je $\sum A = 51269,869 \text{ kWh}$. Investiční náklady na oba typy malé vodní elektrárny byly určeny pomocí měrných investičních nákladů a ročního využití instalovaného výkonu zdroje, viz. tab. 6.1. Pro variantu s Bánkiho turbínou vychází celkové investiční náklady $N = 994\,700 \text{ Kč}$, roční zisk $Z_r = 179\,158 \text{ Kč}$ a doba návratnosti je $T = 5,65 \text{ let}$. Pro variantu s Kaplanovou turbínou vychází celkové investiční náklady $N = 1\,167\,250 \text{ Kč}$, roční zisk $Z_r = 165\,601 \text{ Kč}$ a doba návratnosti je $T = 7,05 \text{ let}$.

Pro stavbu malé vodní elektrárny na tomto toku je lepší varianta se Bánkiho turbínou, která díky velké toleranci pracuje po většinu roku. Bánkiho Turbína je navíc levnější a technologicky méně náročná na výrobu.

POUŽITÁ LIERATURA

- [1] BRAUNER, Jiří; ŠINDLER, Zdeněk. Elektrická část elektráren. I. vydání. Ostrava : Vysoká škola báňská v Ostravě, 1987. 243 s.
- [2] I-EKIS.cz [online]. 2008 Energie vody. Dostupné z WWW: <<http://www.i-ekis.cz/?page=voda>>.
- [3] Vosaspsekrizik.cz [online]. VOŠ a SPŠ elektrotechnická Františka Křižíka. Dostupné z WWW: <<http://www.vosaspsekrizik.cz/cs/download/studium/sps/elektroenergetika/male-vodni-elektrarny.pdf>>.
- [4] Abeceda vodních toků [online]. . Dostupné z WWW: <<http://mve.energetika.cz/>>.
- [5] HOLOTA, Miroslav. Malé vodní elektrárny. Česká matice technická, 2002. ISBN 80-200-0828-4.
- [6] MELICHAR, Jan; VOJTEK, Jan; BLÁHA, Jaroslav. Malé vodní turbíny : Konstrukce a provoz. Vydání první. Praha : Vydavatelství ČVUT, 1998. 299 s. ISBN 80-01-01808-0.
- [7] PETROV, G. N. *Elektrické stroje 2: Asynchronní stroje - synchronní stroje*. 2. oprav. a dopl. vyd. Praha: Academia, 1982. 728 s. ISBN 509-21-857.
- [8] Doležal, J., a kol.: Jaderné a klasické elektrárny, CVUT, Praha, 2011, ISBN: 978-80-01-04937-2
- [9] Mastný, P., a kol: Obnovitelné zdroje elektrické energie, CVUT, Praha, 2011, ISBN: 978-80-01-04936-5
- [10] Tzb-info.cz [online]. Podpora energetické efektivity v České republice v kontextu ostatních zemí EU I. Dostupné z WWW: <<http://energie.tzb-info.cz/energeticka-politika/6648-podpora-energeticke-efektivnosti-v-ceske-republice-v-kontextu-ostatnich-zemi-eu-i>>.
- [11] voda [online]. Dostupné z WWW: WWW: <<http://www.ueen.feec.vutbr.cz/~mastny/vyuka/mmze/skripta/voda.pdf>>.
- [12] KOČMAN, Stanislav. synchronní stroje. Katedra obecné elektrotechniky FEI VŠB – TU Ostrava
- [13] Česká republika. Vyhláška č. 475/2005 Sb., kterou se provádějí některá ustanovení zákona o podpoře využívání obnovitelných zdrojů.